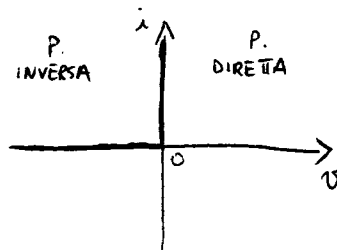
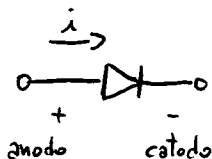
DIODI

- Diodo ideale
- Diodi a giunzione pn
- Caratteristica diretta
- Caratteristica breakdown -> diodi Zener
- Raddrizzatori
- Limitatori e circ. di aggancio
- Fisica del diodo
- Applicazioni speciali -> fotodiodi, LED,...

Il diodo e' l'esempio piu' semplice di dispositivo non lineare. Esso ha largo utilizzo nell'elaborazione dei segnali, in quelle situazioni dove la non linearita' e' necessaria: ad esempio, generazione di tensioni continue partendo da alternate o la generazione di varie forme d'onda.

Diodo IDEALE

due "zone" di funzionamento

- Polarizzazione inversa

  Se si applica al diodo ideale una tensione negativa, esso si comporta come un circuito aperto e quindi non si ha scorrimento di corrente
  -> il diodo e' INTERDETTO (cut-off) - OFF

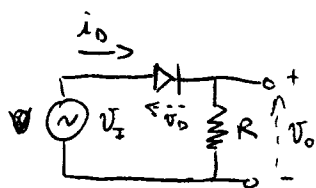
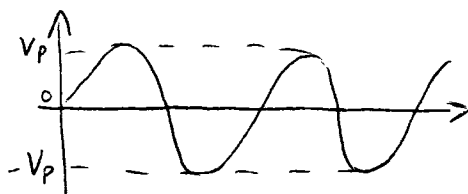
- Polarizzazione diretta

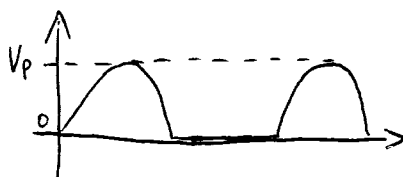
  Se invece la tensione applicata al diodo e' positiva, si entra nella zona di CONDUZIONE e il diodo si comporta come un corto circuito
  -> TURNED ON (ON)

Il simbolo circuitale del diodo ricorda il verso in cui si ha scorrimento di corrente.

La caratteristica del diodo può essere considerata lineare a tratti, rimanendo in una delle due zone si può quindi procedere con un'analisi di tipo lineare. Se la variazione del segnale è tale da superare la discontinuità della caratteristica l'approccio lineare non è più valido.
Data la caratteristica del diodo - corrente infinita in polarizzazione diretta - è chiaro che è necessario disporre nel circuito una opportuna limitazione della corrente circolante.

Raddrizzatore (A UNA SEMIONDA) => generazione di tensioni DC a partire da tensioni AC

tipico utilizzo del diodo

v_I è una tensione sinusoidale con valori tra V_p e $-V_p$

Ad ogni passaggio di v_I da 0 si ha un cambiamento della zona di polarizzazione del diodo. Durante la semionda positiva ($0 < v \leq V_p$) il diodo è polarizzato direttamente e si comporta come un corto circuito.
Durante la semionda negativa, invece, ($0 > v \geq -V_p$) il diodo è in zona di interdizione e si comporta come un circuito aperto.

La tensione in uscita dal raddrizzatore, v_o, durante la semionda positiva segue l'andamento del segnale originario v_I; durante la semionda negativa (cioè finché il diodo è interdetto) la tensione in uscita sarà invece nulla.

Misurando la v_D, tensione di caduta sul diodo, si trova che essa è nulla durante la semionda positiva (il diodo è un corto circuito) mentre seguirà l'andamento della semionda negativa durante la fase di interdizione (il diodo è un circuito aperto ed ai suoi capi si misura tutta la tensione di alimentazione)

Porte logiche a diodi - funzioni OR e AND

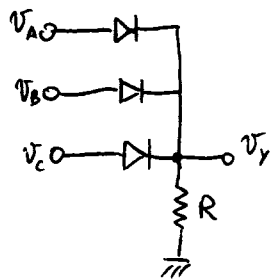
v_A, v_B, v_C -> tensioni legate alle variabili di ingresso

v_Y -> tensione legata alla variabile d'uscita

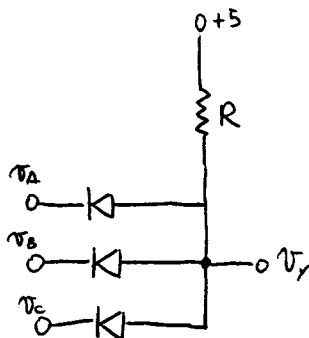
Si suppone 0 volt = ⊥ livello basso, +5 volt livello alto

- OR

→ "se almeno un ingresso e' 'alto', e' 'alta' anche l'uscita"

v_A, v_B, v_C, v_Y, R

Se gli ingressi non sono connessi, o lo sono a livello basso, i diodi sono interdetti e la R di pull-up impone v_Y a massa, quindi a livello basso.

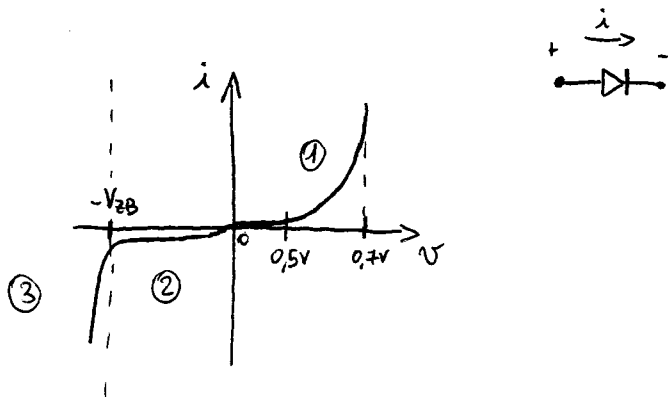
E' sufficiente che una sola tensione di ingresso diventi >0 che il diodo corrispondente entra in conduzione, imponendo all'uscita la stessa tensione: la R permette infatti ciò evitando un corto circuito dell'ingresso con la massa.

- AND

Se gli ingressi sono a livello basso il diodi sono in conduzione, imponendo anche all'uscita il livello basso.

Nel momento in cui TUTTI gli ingressi sono a livello alto, i diodi sono interdetti e non essendoci passaggio di corrente su R, la tensione di alimentazione di 5V non "cade" su R ma viene portata al punto di output di v_Y.

Diodi a giunzione PN - DIODI REALI

silicio

La caratteristica corrente-tensione del diodo reale si discosta leggermente da quella del diodo ideale, tale differenza è dovuta agli effetti fisici del materiale.

Nel diodo reale, si osservano tre "zone" di funzionamento:

1. polarizzazione diretta
2. polarizzazione inversa
3. breakdown

1 - Polarizzazione diretta

La regione di funzionamento diretta inizia quando la tensione applicata al diodo è positiva. Diversamente dal caso ideale dove la corrente è infinita per $v > 0$, nel diodo reale la corrente è espressa analiticamente dalla relazione

$$i = I_S \left(e^{v / m V_T} - 1 \right)$$

I_S: costante che caratterizza il diodo - CORRENTE di SATURAZIONE -

parametri

I_S ⇒ CORRENTE DI SATURAZIONE, caratterizza il diodo ed è, per una data temperatura, sempre costante. È proporzionale all'area del diodo. Per piccoli segnali, $\approx 10^{-15}$ A

v ⇒ tensione di alimentazione del diodo

V_T ⇒ TENSIONE TERMICA

$$V_T = k \frac{T}{q}$$

dipende solo dalla temperatura - t. ambiente ⇒ $V_T \approx 25$ mV

k → costante di Boltzmann $= 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K

T → temperatura assoluta in K

q → carica dell'elettrone $= 1,6 \cdot 10^{-19}$ C

m ⇒ COSTANTE (con valori compresi tra)
- $= 1$ diodi normali, TIPICO
- $= 2$ diodi in forma discreta

$$i = I_s \left(e^{v/mV_T} - 1\right)$$

↓

per elevate correnti di polarizzazione può essere approssimata

$$i \gg I_s \qquad i = I_s e^{v/mV_T}$$

⇕ → valide per molte decadi

$$v = mV_T \ln\left(\frac{i}{I_s}\right)$$

esempio - corrente I_1 corrispondente a una tensione V_1

$$I_1 = I_s e^{V_1/mV_T}$$

- corrente I_2 corrispondente a una tensione V_2

$$I_2 = I_s e^{V_2/mV_T}$$

$$\frac{I_2}{I_1} = e^{(V_2 - V_1)/mV_T} \Rightarrow V_2 - V_1 = mV_T \ln\left(\frac{I_2}{I_1}\right)$$

$$V_2 - V_1 = 2{,}3\, mV_T \log_{10}\left(\frac{I_2}{I_1}\right)$$

Da ciò si ricava che ogni variazione di un fattore 10 della corrente la tensione varia di $2{,}3\, mV_T$ → 60 mV ($m=1$) ; 120 mV ($m=2$)

VARIAZIONE I DI UNA DECADE → VARIAZIONE TENSIONE DI 60 mV

È utile usare una scala logaritmica → nella progettazione si approssima una pendenza di 0,1 V/decade.

Per tensione di polarizzazione inferiore al valore di soglia (CUT-IN), pari a circa 0,5 V, la corrente è trascurabile. Per la caratteristica esponenziale, si assume solitamente che in piena conduzione il diodo presenti una caduta di tensione di 0,7 V.

In base al dimensionamento del diodo, la "piena conduzione" varia. Ad esempio, potrebbe esserci una $i = 1$ mA per diodi di segnale, mentre $i = 1$ A per diodi di potenza.

EFFETTI della temperatura

↘ I_s e V_T variano con la temperatura, e quindi varia anche la caratteristica corrente-tensione.

Per una certa corrente costante, la tensione nel diodo decresce di circa 2 mV per ogni incremento di 1°C di temperatura. Tale effetto viene sfruttato per la realizzazione di termometri elettronici.

Polarizzazione inversa

Il diodo reale in polarizzazione inversa, cioe' quando e' applicata una tensione negativa, presenta una corrente molto ridotta. La precedente relazione e' ancora valida:

$$i = I_S(e^{v/nV_T} - 1)$$

Il termine esponenziale diventa trascurabile, ne deriva che la corrente in polarizzazione inversa e' data da:

$$I \cong -I_S$$

In realta' la corrente di polarizzazione inversa e' spesso diversi ordini di grandezza maggiore rispetto a I_S, presenta incrementi con il decrescere della tensione (aumento della tensione negativa) ed e' instabile rispetto alla temperatura.

Breakdown

Quando la tensione negativa cresce in modulo oltre un certo valore di soglia (definito per ogni diodo) la corrente inversa cresce molto rapidamente. Il diodo di per se' in questa condizione non subisce un danneggiamento, ma la corrente deve essere esternamente limitata affinche' il diodo non debba dissipare una potenza eccessiva.
La tensione di breakdown e' sfruttata nei diodi zener come regolatori di tensione.

Modelli della caratteristica diretta del diodo

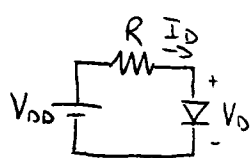
L'analisi di circuiti che contengono diodi può essere svolta utilizzando, a seconda del tempo disponibile, dei dati che si conoscono e della precisione richiesta, diversi modelli del diodo.

Si ha la necessità, dato un circuito, di analizzarne rapidamente le caratteristiche di funzionamento: si procede in genere con il modello più approssimato e veloce, per proseguire (eventualmente con sistemi CAD) nell'analisi più dettagliata.

- modello ESPONENZIALE < ANALISI GRAFICA / ANALISI ITERATIVA
- modello LINEARE A TRATTI
- modello A CADUTA DI TENSIONE COSTANTE
- modello IDEALE
- modello PER PICCOLI SEGNALI

Modello ESPONENZIALE

Il modello esponenziale è il più accurato; data la forte non linearità del diodo richiede tuttavia un maggiore dispendio di risorse nel calcolo e di tempo.

Si utilizza un semplice circuito:

→ Si ipotizza $V_{DD} \gg 0{,}5V$, quindi $I_D \gg I_S$ ←

Ⓐ $$I_D = I_S\left(e^{V/nV_T} - 1\right)$$

Ⓑ $$I_D = \frac{V_{DD} - V_D}{R}$$

} relazioni note

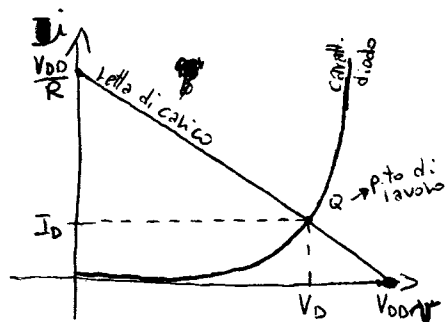
Si ipotizzano inoltre n e I_S noti.

→ incognite I_D, V_D

La soluzione può essere ottenuta per via grafica o per via iterativa.

- Analisi grafica

Si riportano su un diagramma $i - v$ le funzioni descritte dalle relazioni note. Si ottiene quindi una curva (che rappresenta la caratteristica Ⓐ del diodo) e una retta (che rappresenta la RETTA DI CARICO del circuito). Il punto di intersezione tra le due funzioni determina il punto di LAVORO,

le cui coordinate v e i corrispondono alle quantita' V_D e I_D cercate.

La pendenza della retta di carico e' rappresentata in modo grafico da $-\frac{1}{R}$.

Il metodo e' lungo e risente delle imperfezioni grafiche, quindi non e' il piu' indicato nella quasi totalita' dei casi.

- Analisi iterativa

Si suppongono i dati, relativamente allo stesso circuito: $V_{DD} = 5\,V$, $R = 1\,k\Omega$. La corrente del diodo vale 1 mA in corrispondenza di una tensione di 0,7 V; la caduta di tensione ai suoi capi varia di 0,1 V ogni decade di variazione della corrente. Si vogliono calcolare V_D e I_D.

1) Si immagina che V_D sia uguale a 0,7 V. Si utilizza ③ per determinare la corrente.

$$I_{D_1} = \frac{V_{DD} - V_D}{R} = \frac{5 - 0{,}7}{1k} = 4{,}3\ mA$$

2) Si utilizza l'equazione del diodo per ottenere una migliore stima di V_D.

$$V_2 - V_1 = 2{,}3\, m V_T \log \frac{I_{D1}}{I_1}$$

$$\Downarrow \rightarrow 2{,}3\, mV_T = 0{,}1\ V$$

$$V_{D_1} = V_2 = V_1 + 0{,}1 \log \frac{I_{D1}}{I_1} = 0{,}763$$

↳ $\cdot V_1 = 0{,}7V$
$\cdot I_1 = 1\ mA$
$\cdot I_2 = 4{,}3mA$

3) Si ripetono i punti 1) e 3) ottenendo di volta in volta valori (nell'ordine) di I_D e V_D piu' precisi, fermandosi quando la varia.

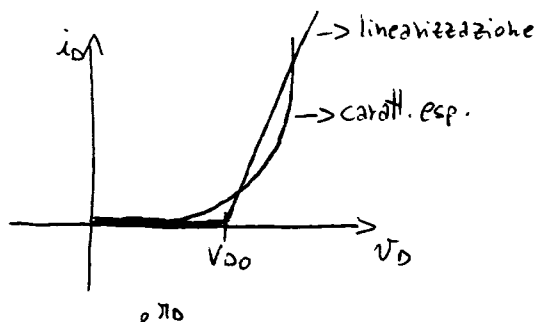
zione tra un passaggio ed il successivo è minima. In questo caso, ripetendo una seconda volta si ottiene

$$I_{D_2} = \frac{V_{DD}-V_{D_1}}{R} = \frac{5-0{,}763}{1k} = 4{,}237 \text{ mA}$$

$$V_{D_2} = V_{D_1} + 0{,}1 \log \frac{I_{D_2}}{I_{D_1}} = 0{,}763 + 0{,}1 \log \frac{4{,}237}{4{,}3} = 0{,}762 \text{ V}$$

V_{D_1} e V_{D_2} sono molto simili, così come I_{D_1} e I_{D_2}, quindi una soluzione sufficientemente precisa è data da V_{D_2} e I_{D_2}.
Anche questo metodo è lungo e scomodo per circuiti complessi.

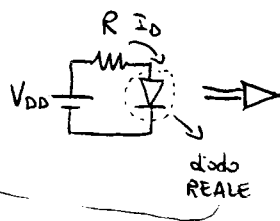
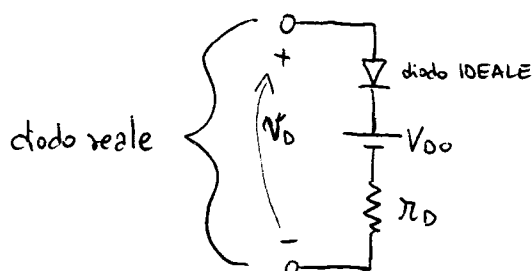
Modello LINEARE A TRATTI

L'analisi può essere notevolmente semplificata linearizzando l'andamento esponenziale, creando un modello lineare a tratti. La scelta migliore è quella di introdurre due rette, la prima con pendenza nulla e la seconda con pendenza $1/r_D$.

$$\begin{cases} i_D = 0 & v_D \leq V_{D0} \\ i_D = (v_D - V_{D0})/r_D & v_D \geq V_{D0} \end{cases}$$

Il valore di V_{D0} e r_D deve essere scelto in maniera da rispettare le caratteristiche del diodo preso in esame. Esso può essere rappresentato in maniera circuitale:

diodo reale: diodo IDEALE, V_{D0}, r_D (tensione v_D tra + e −)

Modello "batteria più resistenza"

V_{DD}, R, I_D, diodo REALE

$$I_D = \frac{V_{DD}-V_{D0}}{R+r_D}$$

$$V_D = V_{D0} + I_D r_D$$

Modello A CADUTA DI TENSIONE COSTANTE

Il modello a caduta di tensione costante prevede che il diodo abbia una V_D ad es. pari a 0,7 v, costanti in qualunque situazione di lavoro. Essa e' in pratica una "linearizzazione a tratti" ammettendo una pendenza infinita della retta che ha origine a V_D.

Adottando per ipotesi $V_D = 0,7$, si ottiene relativamente al circuito:

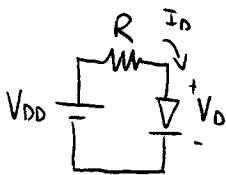
$$V_D = 0,7\ V$$

$$I_D = \frac{V_{DD} - V_D}{R} = \frac{5 - 0,7}{1k} = 4,3\ mA$$

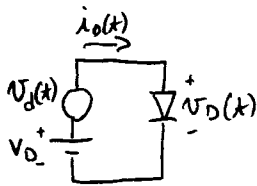
I valori non si discostano molto da quelli già calcolati con metodi più raffinati, quindi il modello a caduta di tensione costante permette una buona approssimazione a fronte di un calcolo molto rapido.

Modello IDEALE

Il modello ideale e' il più semplice in quanto ricalca fedelmente la caratteristica ideale del diodo. É utilizzabile senza introdurre errori eccessivi soltanto quando la tensione di alimentazione é molto maggiore alla tensione di polarizzazione, in modo che l'errore relativo sia trascurabile. Può inoltre essere utilizzato per comprendere in maniera rapida il circuito, ma va raffinato con un altro modello.

Paragone modelli: esp. iterativo, lineare a tratti, V_D costante e ideale

Modello per piccoli segnali

Talvolta si incontrano applicazioni che richiedono di far lavorare il diodo in un punto ben preciso della caratteristica i-v, sovrapponendo alla componente continua un segnale alternato. Per prima cosa va studiato il punto di lavoro con uno dei modelli precedenti. Per descrivere il funzionamento a piccolo segnale, si modellizza l'intorno del punto di lavoro come una retta tangente alla caratteristica stessa, cioé con una resistenza uguale all'inverso della pendenza della retta.

$v_d(t)$, V_D, $i_D(t)$, $v_D(t)$

V_D -> tensione continua che polarizza il diodo

$v_d(t)$ -> tensione alternata sovrapposta

Corrente di polarizzazione -> $I_D = I_S e^{V_D/mV_T}$

tensione istantanea totale $v_D(t) = V_D + v_d(t)$

$$i_D(t) = I_S e^{(V_D+v_d)/mV_T} = I_S e^{V_D/mV_T} e^{v_d/mV_T}$$

$$i_D(t) = I_D e^{v_d/mV_T}$$

Se l'ampiezza di $v_d(t)$ non supera i 5 mV, si puó espandere in serie $i_D(t)$:

$$i_D(t) \cong I_D\left(1+\frac{v_d}{mV_T}\right)$$

(2° TERMINE) APPROSSIMAZIONE DI PICCOLO SEGNALE

$$i_D(t) = I_D + \frac{I_D}{mV_T} v_d$$

=> componente continua + segnale direttamente proporzionale a v_d

$$i_D = I_D + i_d$$

$$i_d = \frac{I_D}{mV_T} v_d$$

$\frac{I_D}{mV_T}$: CONDUTTANZA DIFF. DEL DIODO

RESISTENZA DIFFERENZIALE DEL DIODO

$$r_D = \frac{mV_T}{I_D}$$

Il modello per piccoli segnali, quindi, permette di sostituire al diodo (nell'analisi in alternata) una RESISTENZA, pari a r_D. L'analisi completa prevede quindi:

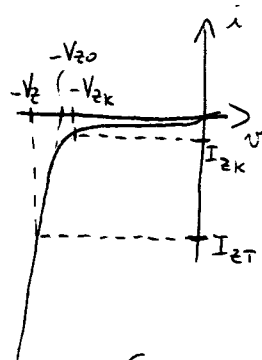
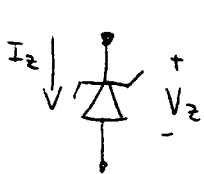
1) Punto di lavoro statico -> $v_d(t) = 0$ (con modello a piacere)
2) Punto di lavoro di piccolo segnale -> $V_D = 0$, il diodo diventa una resistenza

$$r_D^{-1} = \frac{I_D}{mV_T}$$

$$r_D = \frac{mV_T}{I_D}$$

Ciò significa considerare, nell'intorno del punto di lavoro, la caratteristica una RETTA anziché dell'esponenziale -> $v_d(t)$ deve essere ridotto

Funzionamento in breakdown - Diodi zener

I diodi zener sono diodi pensati per sfruttare la zona di breakdown allo scopo di realizzare un regolatore di tensione.

Per correnti maggiori di I_{ZK} (knee current) la caratteristica è pressoché una retta

Valori "nominali": V_Z ad una certa corrente di test I_{ZT}

Se varia la corrente, si ha una (minima) variazione della tensione ai capi del diodo zener, esprimibile come

$$\Delta V = r_Z \Delta I$$

RESISTENZA DIFFERENZIALE (o DINAMICA) - fornita dai datasheet

Nei diodi zener, viene sempre specificata la potenza massima che può essere dissipata.

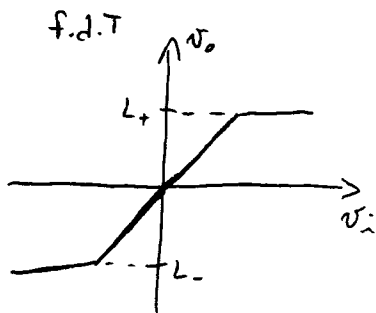
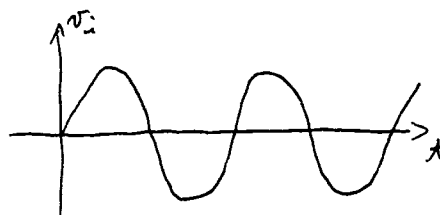
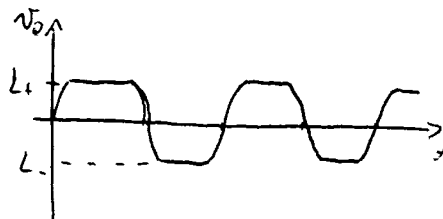
-> Dipendenza di V_Z dalla temperatura
⇓
coefficiente di temperatura TEMCO (TC)

Circuiti limitatori e di aggancio

ulteriore applicazione circuitale dei diodi molto diffusa

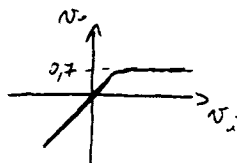
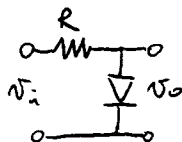
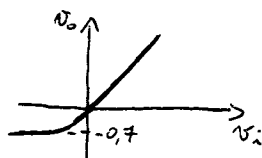
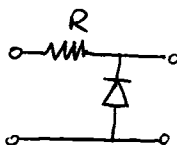
– Circuiti LIMITATORI

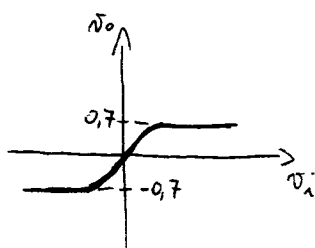
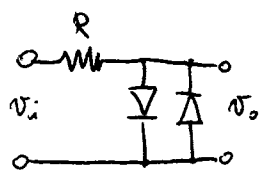
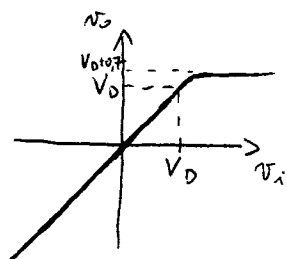
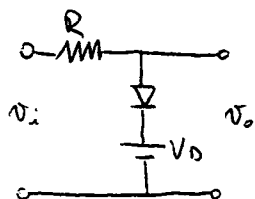
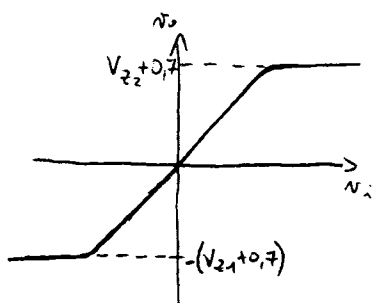
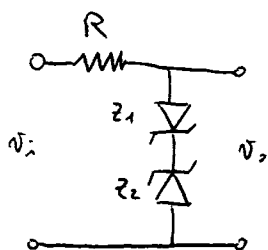
LIMITATORI < ATTIVI / PASSIVI ⇐ solo diodi

Dato un segnale compreso in un certo intervallo, un limitatore è un circuito che presenta caratteristica lineare entro un certo intervallo definito per "tagliare" invece il segnale che supera la soglia

L_+, L_- -> soglie superiori e inferiori

la tensione in uscita viene limitata - AGGANCIATA - al valore di soglia, se questo viene superato dall'ingresso ←

- hard limiter -> pendenza nulla oltre la soglia, nel diagramma v_i-v_o
- soft limiter -> limitatore GRADUALE

Circuiti limitatori tipici

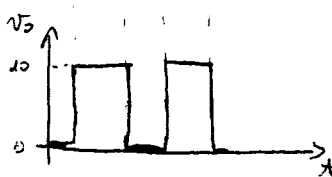
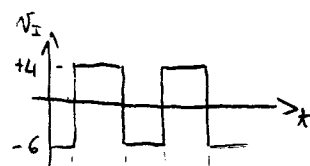
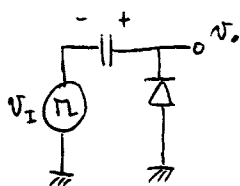
- $v_i < 0,5V$ ⇒ $v_o = v_i$
- $v_i > 0,5V$ ⇒ $v_o \leq 0,7V$

R

v_o -0,7 v_i

- $v_i > -0,5V$ ⇒ $v_o = v_i$
- $v_i < -0,5V$ ⇒ $v_o \geq 0,7V$

- $-0{,}5 < v_i < 0{,}5 \Rightarrow v_o = v_i$
- $v_i < -0{,}5\,;\ v_i > 0{,}5 \Rightarrow |v_o| \leq 0{,}5\,V$

- $v_i < V_D + 0{,}5\,V \Rightarrow v_o = v_i$
- $v_i > V_D + 0{,}5\,V \Rightarrow v_o \leq V_D + 0{,}7\,V$

- $-(V_{Z_1}+0{,}7) < v_i < V_{Z_2}+0{,}7 \Rightarrow v_o = v_i$
- $v_i \geq V_{Z_2}+0{,}7\,;$ $v_i \leq -(V_{Z_1}+0{,}7) \Rightarrow |v_o| \leq V_{Z_m}+0{,}7$

 $\Rightarrow$ diodi ZENER A DOPPIO ANODO

- Circuiti DI AGGANCIO (di ripristino della corrente continua)

Dato un segnale alternato, e' possibile renderlo UNIPOLARE introducendo cioe' una componente continua.

A seconda della polarita' del diodo, la forma d'onda in uscita e' tutta positiva (esempio) o tutta negativa